

ЭНЕРГИЯ ИОНИЗАЦИИ МЕЛКИХ ДОНОРОВ В Δ_1 - МОДЕЛИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ

С. В. Лунёв, А. В. Бурбан, А. И. Зимич, П. Ф. Назарчук

Луцкий национальный технический университет, Луцк, Украина
E-mail: luniovser@mail.ru

Основное отличие полупроводниковых лазеров от твердотельных и жидкостных лазеров заключается в механизме возникновения излучения. Если в ионных лазерах генерация вынужденного излучения происходит в результате оптических переходов между энергетическими уровнями в спектре отдельных ионов, которые образуют трех- или четырех-уровневую систему, то в полупроводниковых главную роль играют переходы между зоной проводимости и валентной зоной или между зонами и уровнями, образуемыми примесями в запрещенной зоне полупроводника. При этом примеси служат источниками носителей зарядов: электронов и дырок, при рекомбинации которых возникают фотоны [1]. Одним из первых полупроводниковых материалов, который испытывали в качестве материала для полупроводниковых квантовых генераторов, был германий. Также, монокристаллический германий широко используется в качестве сырьевого материала для изготовления оптических элементов инфракрасной техники, диодов, дозиметрических приборов, приборов, измеряющих напряженность постоянных и переменных магнитных полей [2].

Наличие в объеме полупроводника дефектов или неоднородностей (например, гетерограниц) приводит к возникновению внутренних деформационных полей в таких структурах [3]. Например, в кремний - германиевых гетероструктурах с квантовыми точками упругие поля деформаций на границе гетероперехода возникают за счет несоответствия постоянной решетки германия и кремния. Величина таких деформационных полей может быть такой, что происходит радикальная перестройка зонной структуры полупроводников. А это, в свою очередь, будет влиять на их электрические и оптические свойства.

Поэтому, целью данной работы является изучение влияния инверсии типа ($L_1-\Delta_1$) абсолютного минимума зоны проводимости в монокристаллах n -Ge на изменение энергии ионизации основного состояния мелких доноров. Как было показано в работе [4], Δ_1 – модель зоны проводимости монокристаллов n -Ge можно получить при сильном одноосном или гидростатическом давлении. На основе вариационного метода Ритца нами рассчитывалась энергия ионизации основного состояния доноров Sb, P, As для Δ_1 – модели n -Ge с учетом анизотропии закона дисперсии и химического сдвига. При этом использовался

следующий потенциал, учитывающий конкретную природу примесного иона:

$$U(r) = -\frac{q^2}{\varepsilon r} \left(1 + A e^{-\frac{r}{r_0}} \right) e^{-\frac{r}{R}},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость кристалла, A – параметр, характеризующий эффективность «сердцевин» иона примеси, r_0 – половина расстояния между двумя ближайшими соседними атомами кристалла, R – радиус экранирования.

В таблице представлены результаты расчетов энергии ионизации основного состояния мелких доноров Sb, P, As и соответствующие экспериментальные результаты, полученные из анализа зависимостей поля ударной ионизации от одноосного давления для этих примесей [4], в монокристаллах n -Ge без учета и с учетом химического сдвига.

Таблица

Расчет энергии ионизации основного состояния мелких доноров в n -Ge, связанных с Δ_1 - долинами

Энергия ионизации основного состояния мелких доноров $E_{IS}^{\Delta_1}$, meV		
Без учета химического сдвига	С учетом химического сдвига	Экспериментальные результаты
30,4	Sb: 32,6	Sb: (35±2)
	As: 42,5	As: (45±2)
	P: 39	P: (41±2)

Как показывают результаты расчетов, при переходе от L_1 к Δ_1 - модели зоны проводимости монокристаллов n -Ge энергия ионизации основного состояния примесей Sb, P, As существенно увеличивается. Модель кулоновского потенциала примесного иона может быть использована в грубом приближении только для примеси Sb в Ge. Для примесей P и As расчеты необходимо проводить с учетом химического сдвига.

1. Рябцев Н. Г. Материалы квантовой электроники. М.: Советское радио, 1972. 384 с.
2. Selesnirov A. A., Aleinikov A. Y., Ermakov P. V., Ganchuk N. S. et al. // Phys Solid State. 2012. V. 54, No. 3, P. 462 – 467.
3. Brunner K. // Rep. Prog. Phys. 2002. V. 65, No. 1, P. 27–72.
4. Luniov S., Burban O., Nazarchuk P. // Journal of Advances in Physics. 2014, V. 5, No. 1. P. 705–711.
5. Kolomoets V., Ermakov V., Panasyuk L., et al. // Physica B. 2013. V. 417, P. 46 – 48.